

용융탄산염 연료전지용 평판형 개질기의 온도와 공간속도에 따른 성능 변화

이상득[†] · 황인철 · 이병권 · 서인석 · 임태훈 · 홍성안

한국과학기술연구원 환경 공정 연구부
(1999년 5월 31일 접수, 2000년 8월 1일 채택)

The Effect of Temperature and Space Velocity on the Performance of Plate Reformer for Molten Carbonate Fuel Cell

Sang Deuk Lee[†], Inchul Hwang, Byung Gwon Lee, Inseok Seo, Tae Hoon Lim and Seong-Ahn Hong

Environment & Process Technology Division, Korea Institute of Science and Technology,
39-1, Hawolkok-dong, Sungbuk-ku, Seoul 136-791, Korea
(Received 31 May 1999; accepted 1 August 2000)

요 약

외부 개질형 MCFC 연료전지 시스템에 적용할 평판형 개질기를 제작하고 성능 시험을 수행하였다. 연소실과 개질실의 온도 분포를 측정하고 수소 연소율, 메탄 전환율 및 생성물 조성을 분석하여 개질기 초기 온도와 공간 속도에 대한 운전 특성을 고찰하였다. 80%의 연료이용률로 운전되는 연료 전지 시스템을 모사한 조건하에서 개질기의 정상 상태 운전이 가능하였고 99%이상의 수소 연소율과 98% 이상의 메탄 전환율을 유지하면서 수 kW급의 수소를 생산할 수 있었다. 개질기 운전 중 측정된 온도 분포 곡선에서 개질기내 위치에 따른 반응 진행 상태를 보여주는 endotherm이 관찰되었다.

Abstract – The plate reformer consisting of combustion chamber and reforming chamber, which can be integrated in the MCFC fuel cell system, has been prepared and the performance test was carried out. In order to study the effect of initial temperature and space velocity on the performance of reformer, the temperature profiles were measured and the conversion of hydrogen and methane and the composition of products were analyzed. Upon the operating condition based on fuel cell stack having fuel utilization of 80%, the reformer was able to generate hydrogen for several kW fuel cell stack, maintaining the hydrogen conversion of above 99% and methane conversion of 98%. The temperature profile recorded during the test showed the endotherm representing the operating state of reformer.

Key words: Plate Reformer, MCFC, Methane Reforming, Hydrogen

1. 서 론

외부 개질형 MCFC 시스템에서 개질기는 시스템을 구성하는 주요장치 중의 하나이다. Fig. 1은 MCFC 시스템 흐름도의 한 예를 보인 것으로 이 그림에서 개질기가 시스템의 핵심 장치인 연료전지 스택과 열적, 물질적으로 밀접하게 연결되어 있음을 알 수 있다.

스택의 anode 배가스는 개질기의 연소실에 공급되어 가연성 성분은 공기에 의해 연소된다. 이때 anode 배가스는 연료농도가 낮아 연소촉매가 이용된다. 연소실에서 연소된 가스는 cathode의 CO₂ 공급원으로 사용되며 그 연소열은 개질실로 전달되어 개질 반응의 열원으로 이용된다. 개질기의 개질실에 공급되는 메탄과 물은 다음과 같은 개질 반응과 변위 반응에 의해 수소와 CO로 전환된 다음 anode의 수소 공급원으로 사용된다[1].

개질 반응: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$, $\Delta H = 49.2 \text{ Kcal/mole}$

변위 반응: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$, $\Delta H = -9.8 \text{ Kcal/mole}$

이와 같이 MCFC용 개질기는 연료전지 스택의 anode와 cathode에 수소 및 CO₂를 공급하는 역할을 담당할 뿐 아니라 저 발열량(500 Kcal/Nm³)의 anode 배가스를 개질 반응의 열원으로 사용하기 때문에 스택의 부하변화에 빠르게 대응할 수 있는 우수한 동적 응답특성이 요구되며, 열전달이 잘 이루어지는 소형이면서 간단한 구조를 가지고 있어야 한다. 이런 특징들이 MCFC용 개질기가 화학공업에 사용되는 통상의 개질기 즉, 정상상태에서 운전되는 단순한 수소공급 장치와 구별되는 중요한 차이점이며 설계시 고려해야할 제약조건이 된다.

현재까지 MCFC용으로 개발되고 있는 대표적인 개질기로는 Hitachi사의 2단연소형, Chiyoda사의 열교환기형, IHI사의 평판형을 들 수 있다[2]. 이 3가지 형태의 개질기는 모두 저 발열량의 anode 배가스를 연소시키기 위해 촉매 연소방법을 택하고 있으며, 연료농도가 희박한 조건에서 완전 연소 능력을 갖는 연소 촉매를 필요로 하고 있다. 특히, 열교환기형 개질기는 연소온도가 높아 상업용으로 판매되는 촉매를 사용할 수 없으므로 내열성 촉매의 개발이 또 하나의 기술적 과제가 되고 있다. 평판형 개질기는 단위 부피당 전열면적이 크기 때문에 연소온도가 낮아 상업용 촉매를 직접 사용할 수 있고 장치도 저가 재질로

[†]E-mail: sdlee@kist.re.kr

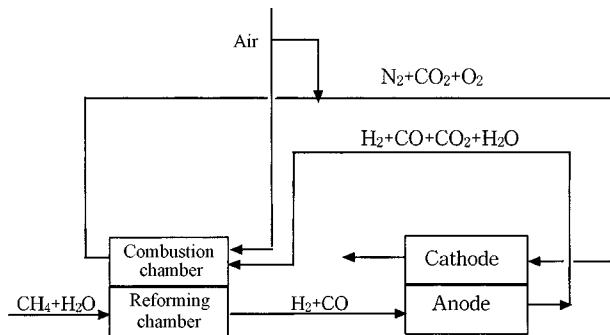


Fig. 1. Simplified flow diagram of a MCFC system.

제작할 수 있다. 또한 구조적으로 적층이 가능하므로 스택과 합체한 스택-개질기 일체형 모듈을 제작할 수 있어 3가지 형태 중 가장 주목을 받고 있다[3].

본 연구에서는 MCFC 시스템의 개질기로 여러 가지의 장점이 있는 평판형을 선정하고, 개질기 개발을 위한 첫 번째 단계로 수 kW급 용융탄산염 연료전지용 개질기와 개질기 시험용 설비를 설계, 제작하여 실험을 실시하였다.

2. 실험

개질기 및 시험설비를 설계하기 위해 연료전지의 연료이용률을 80%로 하여 MCFC 시스템을 모사하였다. 모사 결과를 기준으로 개질기와 시험설비를 제작하고 설치한 후, 실험을 실시하였다.

실험에서는 개질기의 초기 온도, 공간속도(또는 부분부하) 등 조업 변수들이 메탄 전환율, 연소율, 생성물 조성, 연소실과 개질실의 온도분포에 미치는 영향을 조사하였다.

2-1. 실험장치

2-1-1. 개질기

Fig. 2에 본 연구에서 설계한 평판형 개질기의 제작도를 보였다. 개질기는 재질이 SUS316, 양단의 cover plate를 제외한 외형 dimension이 544 mm(length)×414 mm(width)×60 mm(height)이며, 개질실(최대 반응 체적: 2.4 liter), 연소실(최대 반응 체적: 2 liter)과 연료분산실 등 크게 3부분으로 구성되어 있다. 연소실과 연료 분산실은 20.0 mm 간격으로 0.5 mm의 slit이 있는 판으로 분리되며 연료가 연료 분산실을 경유하여 이 slit을 통해 연소실에 고르게 분산되도록 하였다. 가스를 연료 분산실, 연소실, 개질실에 균일하게 분포시키기 위해 입·출구에 각각 분기관(manifolds)을 설치하였고, 연소가스와 개질 가스는 서로 반대방향에서 흐르도록 하였다. 개질실과 연소실에는 개질 촉매와 연소 촉매를 각각 충전하였다. 개질실은 천연가스의 수증기 개질 공정에 사용되는 Haldor Topsoe사의 상업용 촉매(모델명: R-67-7H)를 직경 5 mm 정도의 크기로 잘라 1,874 g(밀도: 1 g/cm³)을 충전하였다. 촉매는 여러 개의 구멍이 있는 실린더 형태의 촉매로 Ni이 세라믹 담지체에 담지되어 있다. 연소실은 Nikki-Universal사의 Honeycomb(200 CPI) 형태의 Pd 담지 촉매(모델명: NHX) 1,146 g(밀도: 0.673 g/cm³)을 연소실의 크기에 맞게 잘라 충전하였다. 사용된 연소 촉매는 휘발성 유기물을 처리하는 촉매 연소 시스템에 주로 사용되며 사용 온도는 250-700 °C이고 적정 공간 속도는 30,000-40,000 Hr⁻¹이다.

개질기 내부의 온도분포를 측정하기 위해 개질실과 연소실 내부에 총 28개의 열전대(Thermocouple Type K)를 설치하였다. 이 중 14개의 열전대를 가스 흐름 방향을 따라 65 mm 간격으로 각각 개질실과 연소실의 중간선상(Fig. 2의 ①)에, 또 다른 14개의 열전대는 각각 개질실과 연소실의 너비 방향의 1/4 선상(Fig. 2의 ②)에 ①에 위치한 열전대와 평행하게 설치하였다. 그리고 개질실과 연소실에 도입되고 배출되는 가스의 온도를 측정하기 위해 가스 분기관의 외벽에 다수의 열전대를 설치하였다.

개질기의 온도를 올리거나 개질기 외부로 손실되는 열을 보상하기 위

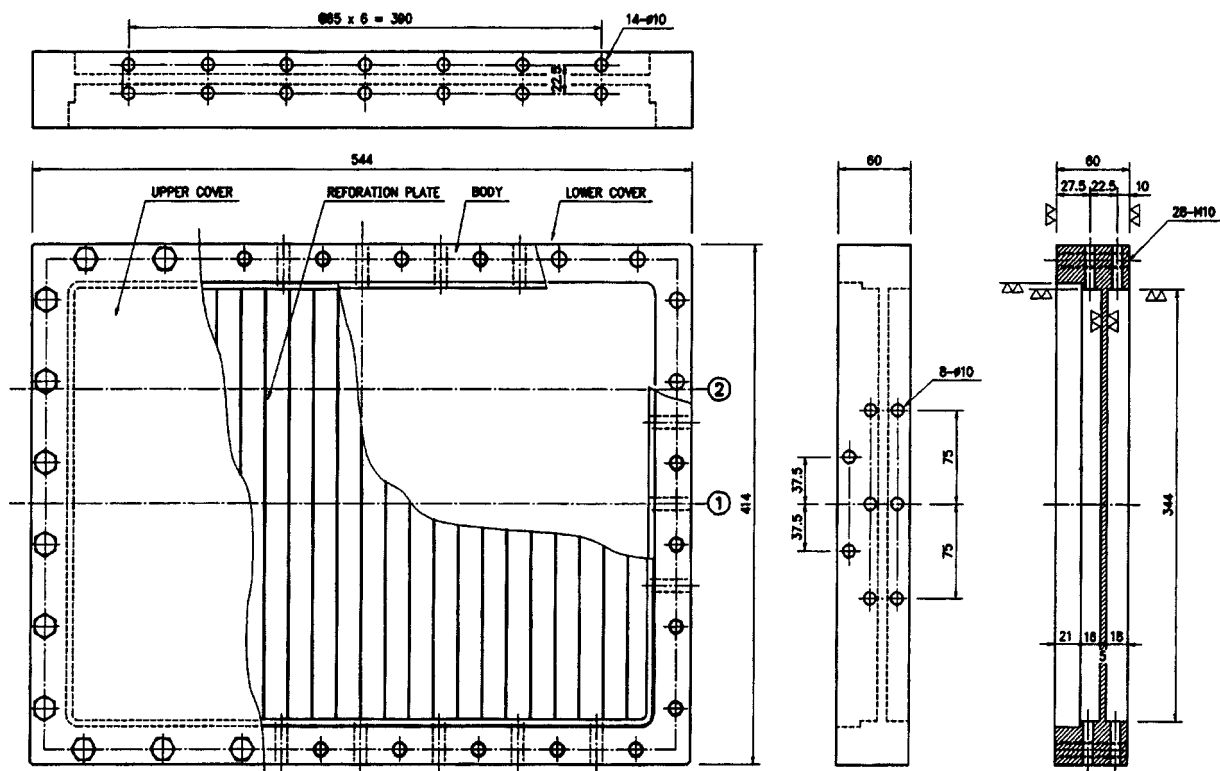


Fig. 2. A drawing of plate reformer.

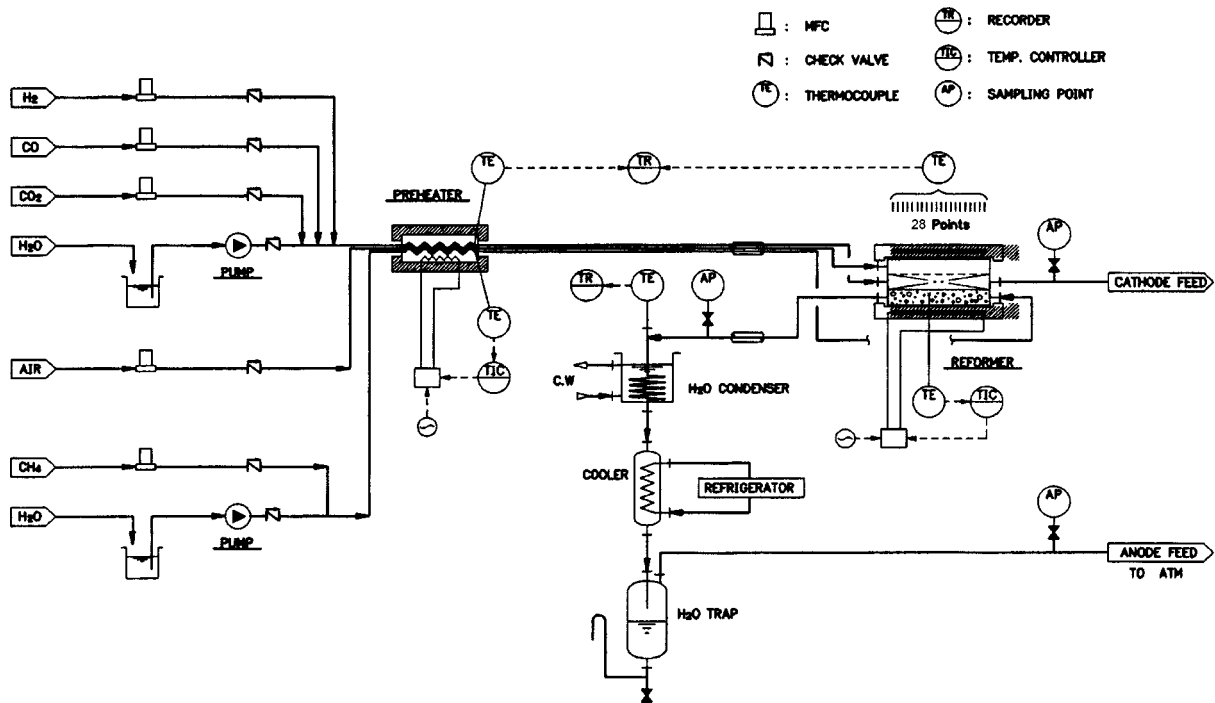


Fig. 3. A schematic diagram of apparatus for plate reformer test.

하여 개질기의 위, 아래에 각각 1 kW 용량의 가열판을 부착하였으며 개질기, 가열판, 고온의 가스가 흐르는 관을 모두 단열재(ceramic wool)로 보온하여 열의 손실을 최대한 줄일 수 있도록 하였다.

2-1-2. 시험 설비

Fig. 3는 kW급 개질기 시험을 위한 설비의 개략도이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 시험설비는 원료 및 연료 공급부, 예열부, 개질부, 후처리 및 가스 분석부로 구성되어 있다.

원료 및 연료 공급부에는 개질 및 연소에 필요한 가스 또는 물을 정량 공급할 수 있도록 가스 실린더, 질량 유량 조절기, 정량 펌프를 설치하였다.

예열부에는 원료 및 연료 공급부에서 이송된 가스 또는 물을 500 °C 이상으로 예열하여 개질부로 공급하는 부분으로 가열로와 예열기를 설치하였다. Furnace는 5 kW 용량의 Lindberg사 제품을 사용하였고, 예열기는 가열로 내부에 나선형으로 감은 SUS316관 또는 Inconel 600관을 넣어 사용하였다. 예열기로 사용된 가스관은 그 길이를 원료 예열용은 6 m, 연료 예열용은 6 m, 공기 예열용은 4 m로 하였다.

개질부에는 개질 반응과 연소 반응을 수행하기 위해 앞에서 언급한 바와 같이 개질실, 연소실, 연료 분산실로 구성된 개질기, 1 kW(220 V) 용량의 가열판 2개, 가스 도입 및 배출 배관을 설치하였다.

후처리 및 가스 분석부에는 reformate의 수분을 응축하기 위한 관형 냉각기를 설치하였고, reformate 및 연소가스를 180 cm 길이의 Carboxsphere(Alltech Co) column이 장착된 gas chromatography(Gow-Mac Instrument Com. Series 580)로 분석하였으며, reformate 및 연소가스의 유량을 측정하기 위한 wet gas meter(Sinagawa Co.)를 설치하였다.

2-2. 실험방법

(1) 개질 촉매와 연소 촉매를 개질기내에서 수소 및 질소(30% H₂/N₂) 혼합가스를 10 l/min로 흘리면서 700 °C에서 6시간동안 in-situ로 전 처리한다.

(2) 촉매를 전 처리한 후, 예열기를 거친 고온의 N₂와 수증기는 개질기의 개질실에, CO, CO₂와 질소는 연료 분산실에, 공기는 연소실에

각각 연속으로 공급하여 개질기의 온도를 올린다. 이때 공급 가스는 그 유량을 개질기 시험조건의 유량과 동일하게 하되 메탄과 수소는 질소로 대체하고, 예열기의 가스 출구온도는 700 °C 정도 되도록 온도 조절계가 부착된 가열로로 가열한다. 또한 개질기에 부착되어 있는 가열판에 100 V(2.2A)-110 V(2.4A)의 일정한 전압을 가하여 개질기 자체의 온도 유지에 필요한 열량을 보충하여 개질기 온도가 700 °C 이상으로 유지되도록 한다. 개질기 온도가 1시간 이상 5 °C 범위 내에 유지되면 개질기의 온도 분포를 온도기록계로 기록하고 이 온도를 반응 전 정상온도(Temp._A)로 택한다.

(3) 개질기의 반응 전 정상 온도가 일정하게 유지되면, 개질실과 연소실에 공급되는 질소를 각각 메탄과 수소로 동시에 대체하여 개질 반응과 연소 반응을 동시에 개시되도록 한다. 반응 중에 개질실과 연소실의 온도 변화를 온도기록계로 측정하여 온도가 1시간 이상 5 °C 범위 내에 유지되면 정상상태의 조건에 도달한 것으로 간주하고, 그때의 온도를 반응 온도(Temp._B)로 택한다.

(4) 개질기의 연소실에서 배출된 연소가스는 그대로 대기로 방출하고, 개질실에서 배출된 reformate는 관형 냉각기를 통과시켜 수분을 응축·제거한 후 대기로 배출한다. 배출 가스는 gas chromatography로 분석하고, 배출 가스의 양과 응축된 물의 양은 각각 wet gas meter와 저울로 측정한다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 온도의 영향

연소 및 개질 반응 가스의 기준 유량 및 조성을 Table 1과 같이 설정하고, 반응온도에 따른 연소율, 메탄전환율, 온도변화 특성을 조사하였다. 기준 유량은 80%의 연료 이용률로 운전되는 1 kW급 MCFC 시스템을 모사하여 결정한 값이며, 반응온도는 개질기의 가열판에 110 V(2.4A) 또는 100 V(2.2A)를 부가하여 일정한 온도 분포를 갖도록 하였다.

3-1-1. 온도분포 특성

Fig. 4에 110 V(2.4A)의 전압을 개질기의 가열판에 부가한 후의 연소

Table 1. Operating condition for reformer test(load: 1 kW)

		Flow rate(l/min)	Composition(mol%)
Fuel	H ₂	2.72	9.0
	CO	0.55	1.8
	CO ₂	12.44	41.4
	Air	14.37	47.8
	Total	30.08	100.0
Feed	CH ₄	2.99	23.5
	H ₂ O	9.73	76.4
	Total	12.72	100.0

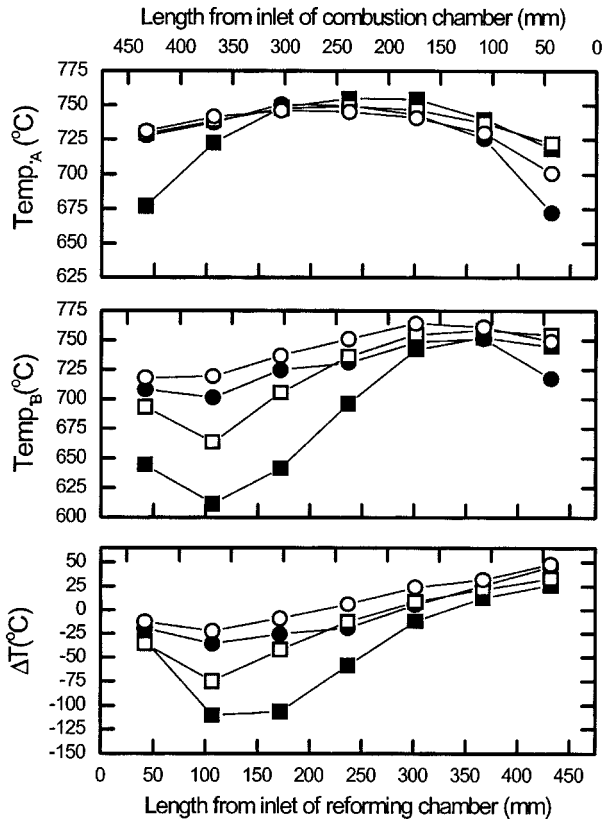


Fig. 4. Temperature distribution in plate reformer(load: 1 kW).
 (voltage: 110 V; space velocity: 1,060 hr⁻¹, Combustion cat.; 407 hr⁻¹, reforming cat.; $\Delta T(^\circ C) = Temp_A - Temp_B$; ■, □: reforming chamber; ●, ○: combustion chamber; closed symbols: Temp. at ① shown in Fig. 2; open symbols: Temp. at ② shown in Fig. 2.)

실과 개질실의 반응 전 정상온도($Temp_A$) 분포, 반응온도($Temp_B$) 분포, 그리고 두 온도 차(ΔT)를 가스 흐름 방향에 따라 도시하였다. 개질기에 도입되는 가스를 질소에서 메탄과 수소로 대체시켜 개질 반응과 연소 반응을 시작한 후 일정시간이 경과하여 개질실과 연소실의 온도가 반응온도($Temp_B$) 분포에서 보여진 것과 같은 정상상태를 유지함을 확인하였다. 이는 연소실에서의 발생한 연소열이 개질실로 전달되고 개질 반응에 흡수되어 개질기의 열수지가 이루어지고 있음을 보여준다.

열수지가 이루어진 초기상태와 반응중의 개질기 온도 분포로부터 ΔT 를 계산하였고 이를 가스 흐름의 방향에 따라 도시하였다. 개질실의 원료 도입부를 기준으로 할 때, 연소실의 ΔT 는 전반부에서는 (-)값을 보이나 점차 증가하여 후반부에서는 (+)값으로 증가하였고, 개질실의 온도는 전반부 100 mm와 200 mm사이에서 급격히 감소하여 107 mm지점에서 ΔT 가 (-)의 최소값을 보인 후, 후반부에서는 서서히 상승하여

330 mm 지점에서 (+)값으로 이동하였다. 이 결과에서 개질 반응이 개질실의 300 mm 이내에서 거의 완료되었고 설계한 개질기의 용량이 1 kW급 보다 크다는 것을 알 수 있었다. 개질실의 중심(①)에서의 ΔT 가 1/4위치(②)의 ΔT 보다 작은 값을 보였다. 이 결과에서 개질실을 통과하는 가스는 흐름 방향의 수직방향으로 균일하게 분산되기보다는 중심에 다소 집중되었고 이곳에서 개질 반응이 보다 많이 일어나고 있음을 알 수 있었다. 연소실 ΔT 및 개질실 ΔT 의 적분치가 (-)의 값을 보였다. 이것으로부터 연료 공급량이 부족하여 연소 반응에 의한 발열량이 개질 반응에 필요한 흡열량보다 적었고, 개질기 온도를 초기 상태와 같게 유지하기 위해서는 anode 배가스 외에 보조 연료가 필요하다는 것을 알 수 있었다. 연소실의 온도 분포는 개질실의 경우와는 다르게 가스 흐름 방향으로 커다란 온도의 차이를 보이지 않고 있으며 가스 흐름의 수직 방향으로도 유사한 값들을 보이고 있다. 이는 연소실에서는 개질실과는 달리 반응물들은 연소분산실을 통하여 균일하게 분산, 전달함으로써 연소 반응이 연소실 전 영역에서 진행됨을 보여준다. 그러나 개질실의 전반부가 위치한 연소실의 후반부에서는 개질실로의 열전달이 많이 이루어져 온도가 다소 감소함을 보인다.

Fig. 5는 부하 전압 100 V(2.2A)에서의 온도 분포를 보인 것이다. 개질실의 ΔT 는 100 mm와 200 mm사이에서 (-)의 최소값을 보이나 Fig. 4에서 보여진 110 V(2.4A)의 경우 보다 작은 값을 나타내었고, 후반부에서도 매우 완만하게 증가하여 370 mm 부근에서 (+)값으로 이동하였다. 이는 110 V(2.4A)의 경우(330 mm) 보다는 (+)으로 이동하는 지점이 개질실의 뒷부분으로 이동하였음을 보여주고 있다. 이것은 개질실의 온도가 낮아 반응속도가 떨어지면서 개질 반응이 보다 넓은 영역에서 진행되었다는 것을 의미하는 것으로 이 온도 분포에서는 측매가 최대

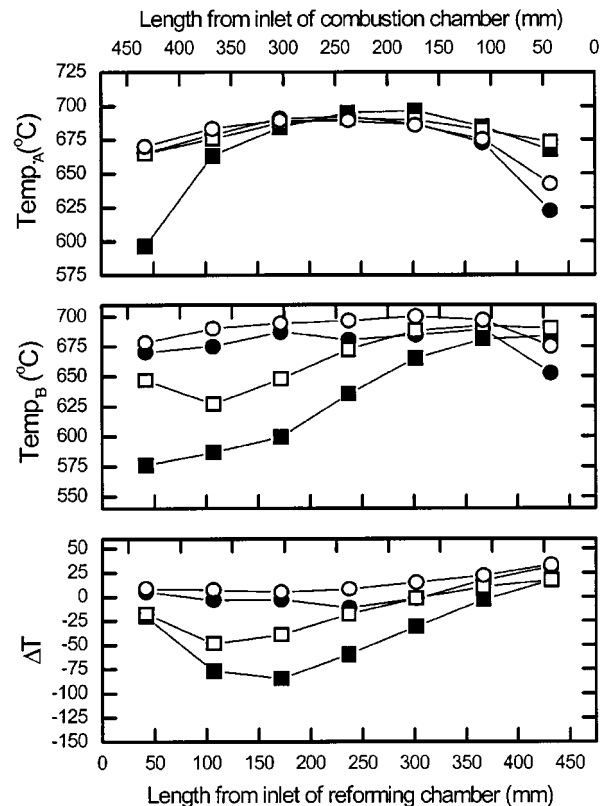


Fig. 5. Temperature distribution in plate reformer(load: 1 kW).
 (voltage: 100 V; space velocity: 1,060 hr⁻¹, combustion cat.; 407 hr⁻¹, reforming cat.; $\Delta T(^\circ C) = Temp_A - Temp_B$; ■, □: reforming chamber; ●, ○: combustion chamber; closed symbols: Temp. at ① shown in Fig. 2; open symbols: Temp. at ② shown in Fig. 2.)

Table 2. Test results of plate reformer: combustion reaction(load: 1 kW)

Average combustion temp.(°C)		735	684
Space velocity(hr ⁻¹)		1,060	1,060
H ₂ Conversion(%)		>99.9	99.6
Fuel inlet temperature(°C)		577	572
Oxidant inlet temperature(°C)		546	546
Outlet temperature(°C)		677	618
Combustion temperature(°C)	Maximum	764	700
	Minimum	701	652

Table 3. Test results of plate reformer: reforming reaction(load: 1 kW)

Average reforming temp.(°C)		707	649
Space velocity(hr ⁻¹)		407	407
CH ₄ conversion(%)		99.2(98.0)	99.6(92.0)
Dry composition of products(%)	CH ₄	0.2(0.4)	0.4(1.9)
	H ₂	78.1(77.2)	78.6(76.4)
	CO	13.0(12.5)	10.0(10.4)
	CO ₂	8.7(9.9)	11.0(11.3)
Total flow rate of dry outlet gases(l/min)		11.7	11.0
Inlet temperature(°C)		532	532
Outlet temperature(°C)		640	607
Reforming Temperature(°C)	Maximum	749	692
	Minimum	612	576

[(): Equilibrium composition and conversion on methane steam reforming at average reformer temperature.]

의 활성을 유지하지 못함을 알 수 있다.

3-1-2. 연소율 및 메탄 전환율

개질기 시험의 연소 반응 결과와 개질 반응 결과를 정리하여 Table 2와 3에 각각 나타내었다. 반응 중 연소실과 개질실의 온도 분포는 부가한 열량에 따라 다르게 유지되었으며 그 온도분포를 최고 온도, 최저 온도 그리고 평균 온도로 표시하였다.

가열판의 전압을 110 V(2.4A)로 유지한 경우, 연소실의 평균 온도는 735 °C였으며 수소의 완전 연소 반응이 이루어졌고, 100 V에서는 684 °C의 평균온도와 99.6%의 수소 전환율을 보였다. 연소실에서 연소된 가스는 다시 cathode로 공급되므로 수소의 농도를 기준치이하로 유지시켜야 한다. 또한 개질기의 열효율을 최대로 하기 위해서는 가능한 많은 양의 연료를 연소시켜야 하므로 연소실 온도를 최소한 700 °C이상으로 유지시켜야 함을 알 수 있다.

개질 반응의 결과를 평균 온도에서의 메탄 전환율과 생성물의 조성을 메탄-수증기 개질 반응의 평형값과 비교하여 제시하였다. 가열판의 부가전압 110 V(2.4A)와 100 V(2.2A)에서 메탄의 전환율은 모두 99% 이상으로 개질실의 평균 온도가 707 °C에서 649 °C로 감소하였음에도 불구하고 메탄전환율의 감소 폭은 상대적으로 적었고 그 값들은 평형 전환율보다 높았다. 또한 수소의 조성도 평형조성보다 약간 높은 값을 보였으나 CO와 CO₂의 조성비는 이론치에 근접하였다.

3-2. 공간 속도의 영향

공급유량(또는 공간 속도)을 기준 유량의 1.5배(1.5 kW 전력 생산에 상당되는 가스량)와 2배(2 kW 전력 생산에 상당되는 가스량)로 증가시켜 공간속도 변화에 따른 일련의 실험을 수행하였다. 이때 개질기의 가열판에는 110 V(2.4A)의 전압을 부가하였다.

3-2-1. 온도 분포 특성

Fig. 6과 7에 각각 1.5 kW와 2 kW에 해당하는 공간속도에 대한 연소실과 개질실의 온도 분포를 보였다. 개질기는 가스의 유량에 상관없이

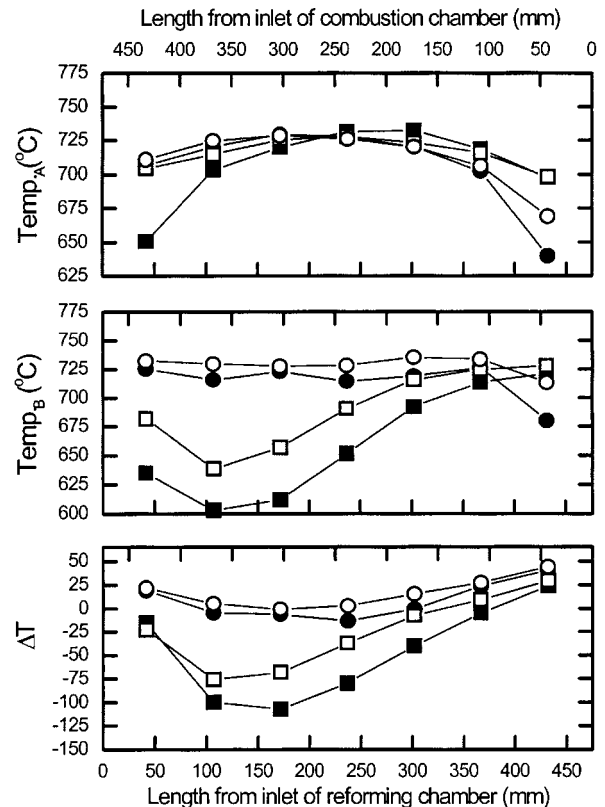


Fig. 6. Temperature distribution in plate reformer(load: 1.5 kW).

(space velocity: 1,590 hr⁻¹, Combustion cat.; 606 hr⁻¹, reforming cat. voltage: 110 V. ΔT(°C)=Temp_A-Temp_B; ■, □: reforming chamber; ●, ○: combustion chamber; closed symbols: Temp. at ① shown in Fig. 2; open symbols: Temp. at ② shown in Fig. 2.)

정상상태에서 온도 분포가 유지됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 6의 경우, 개질실의 ΔT는 개질실의 입구로부터 172 mm위치에서 최소값을 보여주고 있다. 이는 Fig. 4에서 보여진 1 kW의 경우의 107 mm보다 개질실의 후반부로 이동한 값이다. 온도 감소 폭은 1 kW의 경우와 유사한 125 °C였다. ΔT의 상승도 완만하여 370 mm 지점에서 (+)값으로 반전하였다. Fig. 7의 경우에는 온도 변화(ΔT)의 최소값이 더욱 개질기 후반부로 이동하여 개질실의 중심 부분에 위치하게 되고 ΔT의 상승 또한 더욱 완만해져 개질기의 출구에 이를 때까지 ΔT는 (-) 값을 보였다. 그러나 온도 감소 폭은 최고 125 °C 부근에서 유지되었다. 이 결과는 개질 원료의 유량이 증가함에 따라 반응에 참여하는 촉매 영역이 개질실의 후반부로 확산됨을 보여준다. 그러나 촉매 당 반응 속도는 공간 속도에 크게 영향을 받지는 않았다. 가스 흐름의 수직 방향에서의 온도 분포 또한 공간 속도의 증가에 따라 ①위치와 ②위치에서의 온도차가 감소하였다. 이 결과로부터 반응물의 유량이 증가함에 따라 개질실에서 가스의 분산이 중심 부분에서부터 주변으로 증대되고 있음을 알 수 있다. 특히, 2 kW에 해당하는 공간속도에서는 개질실내의 모든 촉매가 개질 반응에 참여하였다는 것을 추정할 수 있다. 연소실의 온도 분포는 1 kW급의 경우와 같이, 국부적으로 급격한 온도의 변화는 보이지 않아 연소 반응은 공간 속도에 상관없이 연소실 전 영역에서 균일하게 이루어지고 있음을 보이고 있다. 그러나 연소실의 ΔT의 변화로부터 알 수 있듯이, 공간 속도가 증가함에 따라 연소실에서 개질실로의 온도 전달이 많이 일어나는 영역은 개질실의 반응 영역에 의존하여 개질실의 후반부 즉 연소실의 전반부로 이동하고 있다.

3-2-2. 연소율 및 메탄 전환율

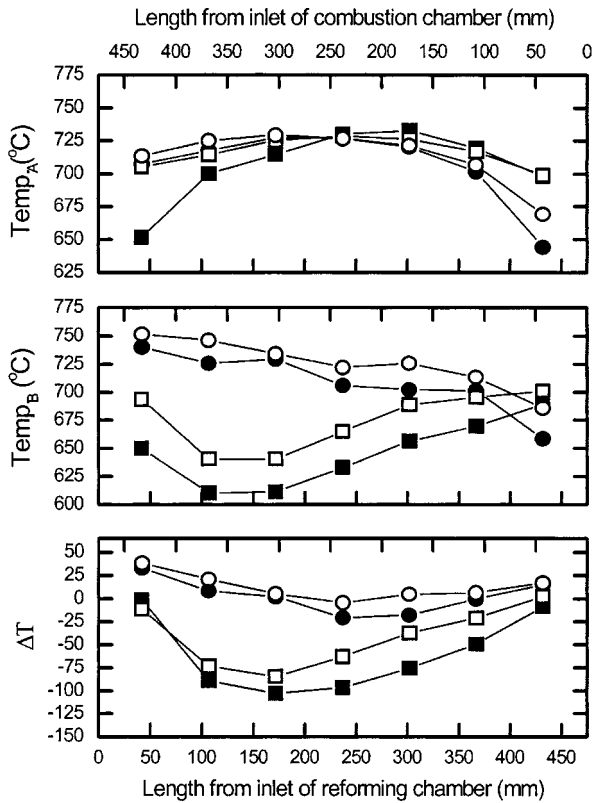


Fig. 7. Temperature distribution in plate reformer (load: 2 kW).

(space velocity: 2,120 hr⁻¹, combustion cat.; 810 hr⁻¹, reforming cat.; voltage: 110 V. $\Delta T(^{\circ}\text{C}) = \text{Temp.}_A - \text{Temp.}_B$; ■, □: reforming chamber; ●, ○: combustion chamber; closed symbols: Temp. at ① shown in Fig. 2; open symbols: Temp. at ② shown in Fig. 2.)

Table 4. Test results of plate reformer: reforming reaction (load: 1 kW)

Average reforming temp.(°C)		707	649
Space velocity(hr ⁻¹)		407	407
CH ₄ conversion(%)		99.2(98.0)	99.6(92.0)
Dry composition of products(%)	CH ₄	0.2(0.4)	0.4(1.9)
	H ₂	78.1(77.2)	78.6(76.4)
	CO	13.0(12.5)	10.0(10.4)
	CO ₂	8.7(9.9)	11.0(11.3)
Total flow rate of dry outlet gases(l/min)		11.7	11.0
Inlet temperature(°C)		532	532
Outlet temperature(°C)		640	607
Reforming temperature(°C)	Maximum	749	692
	Minimum	612	576

[(): Equilibrium composition and conversion on methane steam reforming at average reformer temperature.]

시험 결과를 Table 4와 5에 나타내었다.

Table 4에서 보인 연소 반응의 경우, 수소의 전환율은 공간 속도에 상관없이 99.9% 이상에서 유지되었다. 이때 평균 연소온도는 공간 속

Table 5. Test results of plate reformer: reforming reaction (load: 1.5 kW and 2 kW)

Space velocity(hr ⁻¹)		606	810
CH ₄ conversion(%)		99.5(95.8)	98.3(93.8)
Dry composition of products(%)	CH ₄	0.1(0.96)	0.5(1.4)
	H ₂	79.1(76.9)	78.5(76.7)
	CO	10.4(11.5)	10.9(10.9)
	CO ₂	10.4(10.6)	10.1(11.0)
Total flow rate of dry outlet gases(l/min)		18.4	22.3
Inlet temperature(°C)		559	587
Outlet temperature(°C)		669	660
Reforming temperature(°C)	Maximum	727	701
	Minimum	603	610
	Average	676	660

[(): Equilibrium composition and conversion on methane steam reforming at average reformer temperature.]

도 1590 hr⁻¹에 상응하는 1.5 kW급에서는 721 °C였고 공간 속도 2120 h⁻¹에 상응하는 2kW급에서는 717 °C였다.

개질 반응은 공간 속도의 증가에 의하여 메탄 전환율이 다소 감소하는 경향을 보였다. 그러나 공간 속도 810 hr⁻¹에 상응하는 2 kW급에서도 그 값은 98%를 상회하여 개질기의 평균 온도에서의 평형전환율(93.8%) 이상으로 메탄이 반응하였다. 이는 실험에 사용한 개질기의 용량이 1 kW급 연료전지를 기준으로 한 연소 가스와 개질 가스의 양의 2 배 이상을 수용할 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

kW급 용융탄산염 연료 전지용 평판형 개질기를 제작하고 모사 anode 배가스와 메탄을 이용하여 개질기의 성능 시험을 수행하였다. 실험결과를 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 설계한 개질기로 메탄 전환율을 98% 이상 유지하면서 2 kW급 이상의 수소를 생산할 수 있었다. 이 때의 공간 속도는 연소 촉매의 경우 2,120 hr⁻¹였고 개질 촉매의 경우 810 hr⁻¹였다.

(2) 80%의 연료 이용률로 운전되는 MCFC 시스템을 모사하여 설정된 연소 가스와 개질 가스의 조성에서 연소 반응과 개질 반응은 열수지를 이루어 개질기를 정상 상태에서 운전할 수 있었다.

(3) 작은 크기로 제작 가능하며 넓은 전열 면적을 갖도록 설계된 평판형 개질기는 MCFC형 연료 전지 시스템에 매우 적합한 개질기 형태이다.

참고문헌

1. Twigg, M. V.: "Catalyst Handbook," Wolfe Publishing Ltd.(1989).
2. Lim, T. H., Lim, H. C. and Hong, S.: *Chemical Industry and Technology*, **16**, 407(1998).
3. Hirata, T., Mizusawa, M., Koga, M. and Hatori, S.: *IHI Engineering Review*, **29**, 53(1996).